

CARACTERIZAÇÃO DE UM AÇO DE ALTA DUREZA, APÓS O ENSAIO BALÍSTICO COM PROJÉTIL 7.62 PF*

Suzane de Sant'ana Oliveira¹
Elson Renato Santos Souza²
Ricardo Pondé Weber³
João Carlos Miguez Suarez⁴

Resumo

A exigência atual de novos materiais com alta resistência mecânica levou a um aumento da pesquisa abordando os aços de alta dureza e baixa liga. Estes aços possuem características que os qualificam para uma elevada gama de aplicações, dentre as quais destaca-se o uso em blindagem balística. O estudo das falhas decorrentes à altas taxas de deformação apontam como principal causa o surgimento das bandas de cisalhamento adiabático. Este trabalho visa caracterizar a microestrutura de um aço de alta dureza e baixa liga, após a realização de um ensaio balístico com um projétil 7.62x51 mm perfurante (Pf). A análise superficial do material foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde pode-se observar a ocorrência de uma fratura após a formação da banda de cisalhamento adiabático (*adiabatic shear band*).

Palavras-chave: Alta dureza e baixa liga; Banda de cisalhamento adiabático; Ensaio balístico; Caracterização microestrutural.

CHARACTERIZATION OF A HIGH HARDNESS STEEL, AFTER A BALLISTIC TEST WITH A PROJECTILE 7.62 AP

Abstract

The current demand for new materials with high mechanical strength has led to increased research addressing the high hardness and low alloy steels. These steels have characteristics that qualify them to a high range of applications, among which stands out the use in ballistic armor. The study of failure due to high strain rates indicate the main cause the appearance of adiabatic shear bands. This work aims to characterize the microstructure of a high hardness and low alloy steel, after conducting a ballistic test with a projectile 7.62x51 mm armor piercing (AP). The superficial analysis of the material was performed by scanning electron microscopy (SEM), where one can observe the occurrence of a fracture after the formation of adiabatic shear band.

Keywords: High hardness and low alloy steel; Adiabatic shear band; Ballistic test; Microstructural characterization.

- ¹ *Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Tecnóloga, Aluna de Mestrado no curso de Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ² *Engenharia de Materiais, Mestre, Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento de Blindagens, Departamento de Ciência e Tecnologia, Exército Brasileiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ³ *Doutor em Ciência dos Materiais, Doutor, Professor do curso de Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁴ *Doutor em Ciência e Tecnologia dos Polímeros, Doutor, Professor do curso de Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Apesar da alta densidade, o aço ainda é o material mais utilizado para blindagens, pois agrega propriedades mecânicas, balísticas e características microestruturais fundamentais para proteção a um custo acessível [1]. Com o aprofundamento das pesquisas no campo da falha a elevadas taxas de deformação, percebeu-se que os mecanismos de fratura são provenientes de bandas de cisalhamento. Por isso, atualmente, diversos grupos têm buscado melhor entender a sua formação para evitá-la ou reduzi-la, o que conseqüentemente melhoraria a capacidade de proteção desses aços de blindagem [2-4].

As bandas de cisalhamento podem ser formadas no material independente da estrutura do grão, do modo e da quantidade de deformação [5]. Além disso, estas bandas podem ser classificadas como isotérmicas (geradas em temperatura ambiente e por ação de baixas taxas de deformação) e adiabáticas (conseqüência de um processo intenso e localizado de deformação plástica em um período curto) [5].

Odeshi et. al. [2] e Boakye-Yadom et. al. [3] são dois grupos de pesquisa, que têm demonstrado grande interesse nas bandas de cisalhamento adiabático, pois as mesmas exercem um papel de extrema importância para as falhas ocorridas em materiais dúcteis, que sofrem altas taxas de deformação [4].

Em 2005, Odeshi et al. [2] demonstraram que a banda de cisalhamento era um dos mecanismos de falha gerados em um aço de alta resistência e baixa liga (AISI 4340). Em 2006, Teng et al. [6] pesquisaram a transição de uma banda de cisalhamento adiabático até a fratura, em materiais metálicos.

Este trabalho tem por objetivo examinar o aspecto microscópico da superfície de um novo aço ainda não utilizado em blindagem, após o ensaio balístico com um projétil de 7.62x51 mm Pf a fim de verificar se este é promissor para esta aplicação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço de alta dureza para emprego em blindagens (HHA – do inglês, *High Hardness Armor Steel*), desenvolvido e produzido conforme a Norma MIL-DTL-46100 [7], é o objeto de estudo deste trabalho. Este aço foi fornecido sob a forma de chapas laminadas tratadas termicamente por têmpera e revenido, nas dimensões de 3000 mm x 3000 mm x 8 mm. A composição química do mesmo encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do aço de blindagem [8].

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	P+S
0,31	0,42	0,93	0,57	0,76	0,30	0,05	0,03	0,009

O aço foi fabricado em forno elétrico, refinado por refusão sob escória eletrocondutora (ESR), processo que proporciona inclusões dispersas [9], laminado na temperatura média de 1100°C, temperado a partir de, aproximadamente, 1000°C, por resfriamento rápido com aspersão de água (“roller quench”) e revenido a 400°C. O aço foi avaliado dinamicamente por meio de um ensaio balístico, onde as perfurações, realizadas com energias aleatórias, foram enumeradas, cortadas e posteriormente preparadas para a análise.

2.1 Ensaio Balístico

O ensaio balístico foi realizado com munição 7.62x51 mm perforante (7.62 Pf), conforme a Figura 1. Este projétil possui massa nominal de 9,6g. A distância do provete até o alvo foi de 15 m com 0° de obliquidade [8]. O dispositivo utilizado no ensaio, constituído de estativa com provete de 7.62 mm, equipamento para a medição da velocidade do projétil (“barreira ótica”), suporte de fixação do alvo e placa testemunho. Foi ensaiado um alvo com dimensões de 500 mm x 500 mm x 8 mm, que foi submetido a 8 (oito) impactos distribuídos na superfície do mesmo, em uma faixa de velocidade que variou entre um mínimo de 532 m/s e um máximo de 636 m/s.



Figura 1 – Projétil 7.62 Pf, encartuchado, desencartuchado e apenas o núcleo de aço.

O desempenho balístico do aço de blindagem, em face ao impacto do projétil 7.62 Pf em diversas velocidades, foi avaliado considerando os seguintes parâmetros: Após o impacto do projétil, pode-se ter a ocorrência de penetração completa (PC) ou de penetração parcial (PP), estabelecidas como, perfuração ou penetração, respectivamente. A definição da ocorrência de PC ou PP depende do critério de avaliação empregado, tendo sido utilizado, no presente trabalho, o critério da Marinha, que especifica que uma penetração completa (PC) ocorre quando todo o projétil ou a sua maior parte passa através do alvo [8].

2.2 Caracterização Balística

A chapa, “como recebida”, passou por um ensaio balístico com projétil 7.62 mm (Pf) e sofreu 8 (oito) impactos, os quais ficaram divididos em PC e PP (Figura 2). Apenas 5 (cinco) desses impactos foram escolhidos, pois foram os que apresentaram uma maior profundidade de penetração (completa ou parcial). Amostras de aproximadamente 15 mm X 15 mm passaram por um corte à jato de água para não propiciar quaisquer alterações na microestrutura decorrente de aquecimento (recristalização, por exemplo). Após, a amostra foi lixada, polida e atacada com Nital 2%. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca FEI, modelo Quanta FEG 250, pela observação direta das superfícies impactadas pelo projétil.

No exame do aspecto microscópico da superfície impactada procurou-se avaliar toda a região a sua volta, visando verificar se houve mudança de estrutura ou a ocorrência de algum fenômeno de bandas de cisalhamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação das propriedades mecânicas e balísticas foi realizada na dissertação de Souza [8]. O ensaio balístico realizado mostrou que a V_{50} (velocidade para a qual 50% dos impactos resultam em penetração completa) do material “como recebido” foi de 585 m/s e encontra-se abaixo do estabelecido na norma MI-DTL-46100E [7]. A Figura 2 mostra a microestrutura do material “como recebido”. Observa-se que a microestrutura é formada por martensita revenida, como esperado.

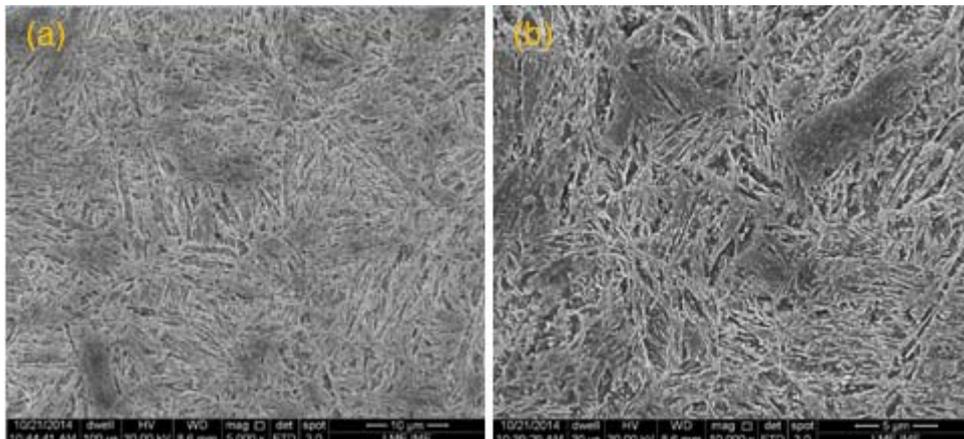


Figura 2 – Microfotografias por MEV típicas do aço HHA “como recebido”, temperado e revenido: (a) em menor aumento (5000X); (b) em maior aumento (10000X).

Observa-se que as agulhas martensíticas ficaram bem evidentes, após o ataque com Nital 2%.

A figura 3 apresenta a fotografia da chapa após o ensaio balístico, possibilitando identificar a ordem com que os tiros foram realizados.



Figura 3 – Fotografia da face frontal da chapa de aço, após o ensaio balístico, mostrando a ordem dos tiros, tal qual a forma como foram extraídos em relação a direção de laminação (L – longitudinal e T – transversal).

A Tabela 2 mostra as condições nas quais os impactos foram realizados.

Tabela 2 – Condições de tiro.

Material	Munição	Tiro	Projétil	Resultado
			V1 (m/s)	
Aço HHA 8,00 mm	7.62 Perf	1	530	PC
		2	560	PP
		3	537	PP
		4	570	PC
		5	636	PC

A Figura 4 é uma representação macrográfica da perfuração número 1. Essa amostra foi retirada da face frontal e cortada na direção longitudinal à direção de laminação. A seta indica a direção de impacto.

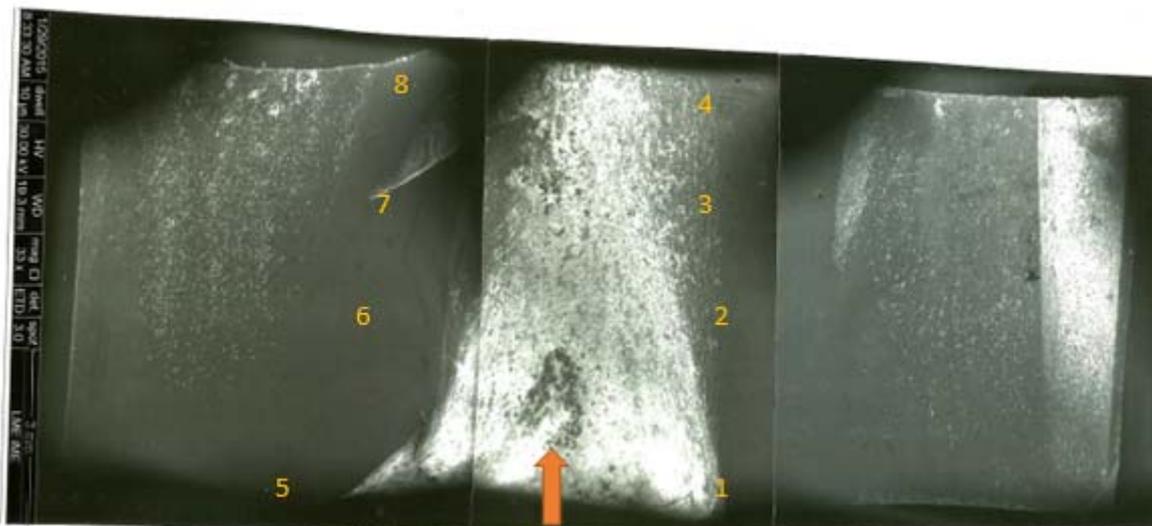


Figura 4 – Imagem de MEV de toda a superfície da amostra.

As figuras a seguir (Figuras 5 a 11) exibirão cada um dos pontos destacados na Figura 4 e algumas ampliações dos mesmos, os quais permitirão ao leitor visualizar as mudanças microestruturais decorrentes do impacto.

A Figura 5, é a visualização do ponto 1, área à direita do impacto realizado pelo projétil. Na imagem (a), com o aumento de 500X, pode-se perceber que, embora a chapa tenha sentido toda a compressão, confirma-se com o aumento de 1500X (b) que não houve mudança na microestrutura, mantendo-se totalmente martensítica.

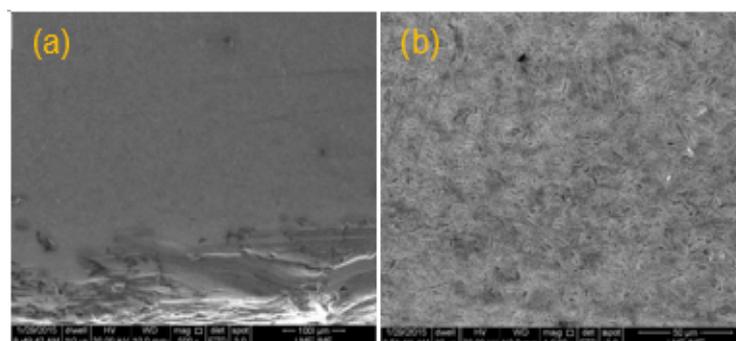


Figura 5 – Imagem típica de MEV do ponto 1, (a) região inicial em volta do impacto em 500X e (b) em 1500X.

O ponto 2 apresentou as mesmas características do anterior, apenas confirmando a estrutura martensítica sem nenhuma alteração. Entretanto, a Figura 6 mostra que o ponto 3 apresentou uma banda levemente transformada (a), a qual percebeu-se uma transformação mais acentuada (b) e confirmou-se tal fato com uma imagem de aumento superior (c), onde consegue-se visualizar uma banda de cisalhamento adiabático (BCA).

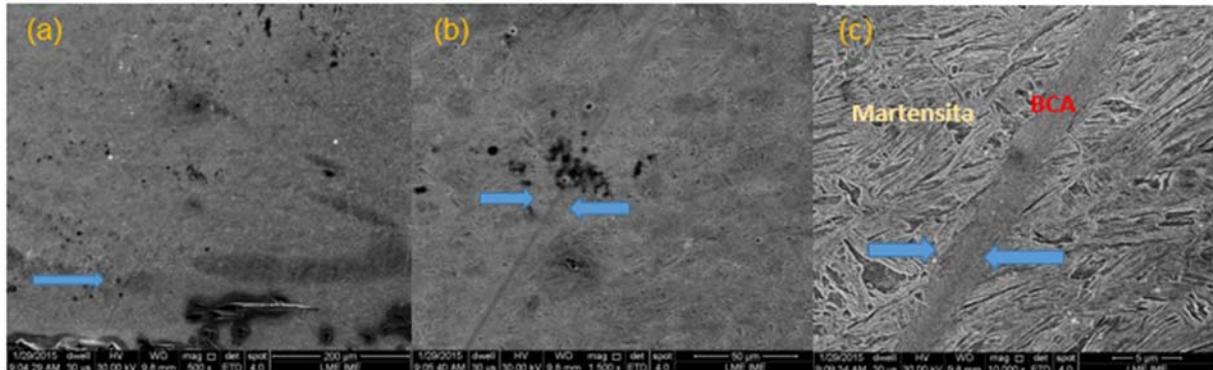


Figura 6 – Imagem típica de MEV do ponto 3 em (a) 500X, (b) em 1500X e (c) 10.000X.

A Figura 7 mostra uma nucleação de trinca dentro de uma banda de cisalhamento adiabático no ponto 4. Conforme analisado por Lins e colaboradores [4], a formação desta trinca está vinculada ao fato de ter ocorrido uma recristalização na estrutura da banda.

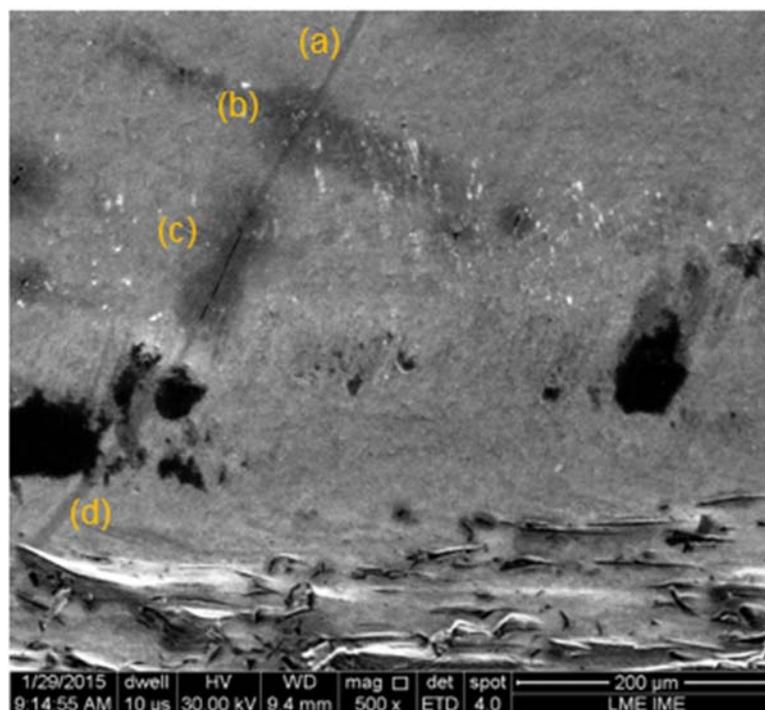


Figura 7 – Microestrutura do ponto 4, analisado via MEV, com um aumento de 500X, mostrando a banda de cisalhamento adiabático.



Figura 8 – Imagem de MEV do segmento da banda de cisalhamento com um aumento de 1500X.

A Figura 9, referente ao ponto 5, localizado à esquerda do impacto, mostra uma região com trinca em 500X (a). No aumento de 1500X (b) consegue-se visualizar a transformação de fase que ocorreu em volta da trinca, sinalizada pela seta vermelha. A seta azul está apenas mostrando a fase martensítica evidenciando o contraste entre as duas fases.

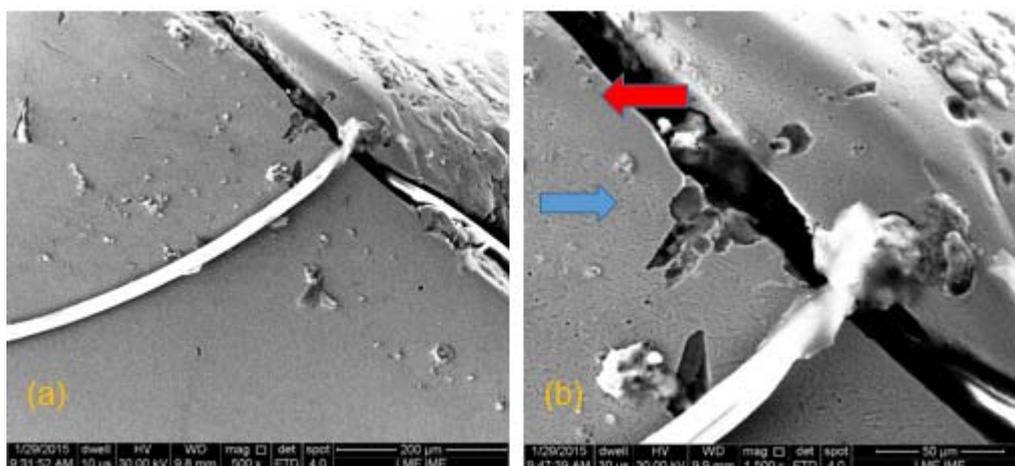


Figura 9 – Microestrutura do lado esquerdo do impacto. (a) Imagem em 500X e (b) imagem em 1500X, evidenciando a transformação de fase no local de impacto.

A Figura 10 é a imagem do ponto 7, onde pode-se visualizar uma grande trinca dentro de uma região transformada e uma nucleação inserida em uma BCA. Como a área recristalizada propicia o surgimento de bandas e pode levar a fratura [4], a visualização da trinca dentro da banda é perfeitamente clara.

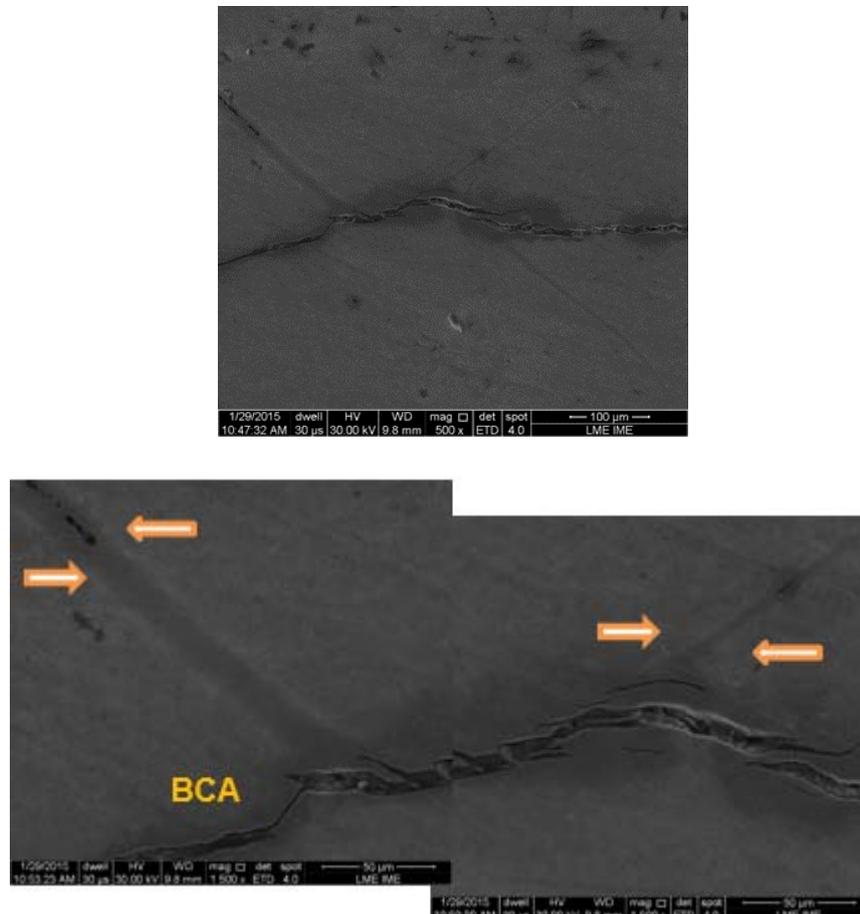


Figura 10 – Visualização via MEV em 500X (acima) e 1500X (abaixo), de uma região com trinca e BCA.

A Figura 10 mostra a extensão da banda recristalizada nesta região composta por trincas, destacadas pelas setas.

A Figura 11 mostra o ponto 8 em 500X. Pode-se perceber, nesta imagem, que mais uma vez o surgimento da trinca foi decorrente da BCA.

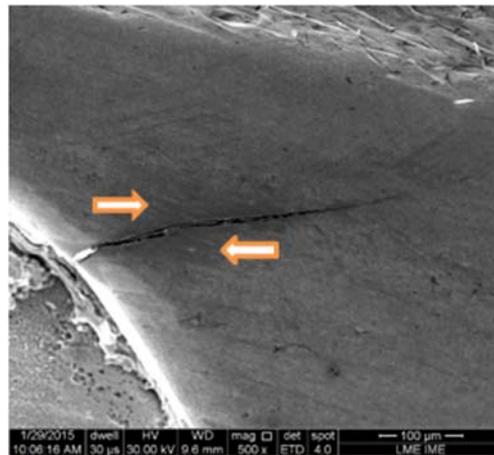


Figura 11 – Visualização em MEV do ponto 8 com um aumento de 500X.

4 CONCLUSÃO

Com base nas informações da literatura e com a visualização das imagens, pode-se concluir que os primeiros pontos da amostra não possuem nenhuma banda de cisalhamento adiabático e pouca transformação, mesmo suportando toda a força compressiva.

As trincas surgiram apenas após a formação das bandas de cisalhamento adiabático. Da mesma forma como Lins [4] citou em seu trabalho que a recristalização levou à formação da trinca, o mesmo ocorreu com o aço HHA.

O fato desse material possuir uma microestrutura martensítica e ter sido revenido abaixo de 500°C são fatores de grande influência sobre a formação desses tipos de bandas em ligas metálicas [10], as quais levam o material à falhas catastróficas.

Novos testes podem ser realizados com este aço objetivando encontrar a microestrutura adequada e pouco propícia a falhas. Entretanto, outros ensaios e análises deverão ser realizados a fim de comprovar demais afirmações encontradas na literatura.

REFERÊNCIAS

- 1 Ubeyli M, Demir T, Deniziz H, Yildirim RO, Keles O, Investigation on the ballistic performance of a dual phase steel against 7.62mm AP projectile, Elsevier, Materials Science and Engineering A 527;2010:2036-2044
- 2 Odeshi AG, Al-Ameeri S, Mirfakhraei S., Yazdani F, Bassim NM, Deformation and failure mechanism in AISI 4340 steel under ballistic impact, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 45, 2005:18-24..
- 3 Boakye-Yadam S, Khan AK, Bassim N, A systematic study of grain refinement during impact of 4340 steel, Elsevier, Materials Science & Engineering A 605, 2014:270-285.
- 4 Lins JFC, Sandim HRZ, Vecchio KS, Aspectos microestruturais da falha de um aço IF deformado via compressão dinâmica a -196°C, Metalurgia e Materiais, REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto,2009;62 (2):167-173.
- 5 Lins, JFC, Caracterização microestrutural de bandas de cisalhamento adiabáticas num aço IF estabilizado ao titânio [tese de doutorado], Lorena, Faculdade de Engenharia Química; 2005.
- 6 Teng X, Wierzbicki T, Couque H, On the transition from adiabatic shear banding to fracture, Elsevier, Mechanics of Materials 39:2007; 107-125.
- 7 US ARMY. Norma MIL-DTL-46100E (MR), Amendment 1, Detail Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness, 2008.

- 8 Souza ERS, Estudo do comportamento microestrutural e balístico de um aço de blindagem após soldagem [dissertação de mestrado], Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia (IME); 2014.
- 9 Colpaert H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. São Paulo: Blucher; 2008.
- 10 Zhang B, Shen W, Liu Y, Zhang R. Some factors influencing adiabatic shear banding in impact wear, Elsevier, Wear 214:1998; 259-263.